

星上定标漫反射板设计研究

施家定 张黎明 曹兴家 徐伟伟 韩慧达 王戟翔

中国科学院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 星上定标器作为遥感卫星在轨辐射定标装置,定标漫反射板(SD)作为定标器中的参考标准板,其结构设计的可靠性将直接影响到星上定标器的定标精度。为了得到星上定标漫反射板结构在航天力学条件下的响应情况,通过振动实验台模拟对其进行加速度过载和随机振动响应特性进行了测试,获得了定标漫反射板组件的加速度过载响应特性、固有频率和随机振动响应特性。同时,为了考察星上定标漫反射板的光学特性,进行了方向半球反射比(DHR)、双向反射分布函数(BRDF)等光学特性的测量。结果表明,漫反射板组件在航天力学条件下强度和刚度都满足设计要求,基频大于120 Hz;而且漫反射板具备高反射率(大于99%)、光谱平坦性、朗伯性等优良光学特性,满足航天应用要求。

关键词 遥感;星上定标;漫反射板;振动;双向反射分布函数

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0828001

Design and Research of Diffuser Panel Used for on-Board Calibration

Shi Jiading Zhang Liming Cao Xingjia Xu Weiwei Han Huida Wang Jixiang

Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Reflective solar bands are calibrated on orbit by a solar diffuser(SD) panel. The SD panel plays an important role in a set of on-board calibrator. Its reliability of the structure design will directly affect the accuracy of the on-board calibrator. In order to get the response situation of the calibration diffuse reflection plate structure under space mechanical condition, vibration test on SD panel is processed. In the test, the data on the frequency of the SD panel structure and the dynamic response are got by stochastic load test method. Meanwhile, the optical properties of the SD panel: hemispherical reflectance direction(DHR) and the bi-directional reflectance distribution function (BRDF) are measured. The results show that the frequency of the structure can meet the design requirements (more than 120 Hz), high reflectance(more than 99%), spectral flatness and good Lambertian scattering properties in reflectance, which are basic requirements for space applications.

Key words remote sensing; on-board calibration; diffuser panel; vibration; bi-directional reflectance distribution function

OCIS codes 280.4991; 160.4670; 160.4760; 290.1990

1 引言

“太阳+漫反射板”^[1]的星上定标方式,由于其能很好地解决全光路和光谱分布差异的问题,因此在星上定标技术中得到广泛推广,并在多个卫星上得到应用。太阳作为星上定标的基准光源,其辐亮度是一个相对恒定的值,在已知漫反射板的双向反射分布函数(BRDF)以及太阳光对漫反射板的入射角度的情况下,通过测量遥感器接受经过漫反射板反射的太阳辐亮度,可实现星上的绝对定标。国外水色卫星(SeaWiFS)^[2]、中等分辨率成像光谱仪(MERIS)、多角度成像光谱辐射计(MISR)、中分辨率成像光谱仪(MODIS)、可见近红外辐射计(VIIRS)等卫星遥感器相继采用这种星上定标方法。

从“太阳+漫反射板”的星上定标方式中可以看出,漫反射板材料的选择,无疑将是该星上定标系统的关键所在。作为最佳的漫反射板材料,应接近理想朗伯体,同时还需具有高反射率以及均匀光谱反射比分布。常见的

收稿日期: 2015-02-02; 收到修改稿日期: 2015-04-17

基金项目: 国家863计划(2012AA12A302)、中国科学院科研装备项目(YZ201125)

作者简介: 施家定(1982—),男,硕士,助理研究员,主要从事光电测量设备机械设计与仿真方面的研究。E-mail: j.shi@foxmail.com

漫反射板材料有硫酸钡、铝、聚四氟乙烯、石英等^[3],铝漫反射板的漫反射特性与余弦特性的偏差较大,且其反射率较低,但它抗紫外能力强,在真空环境下光学性能稳定;石英漫反射板、硫酸钡漫反射板和聚四氟乙烯漫反射板具有良好的余弦特性,在可见和近红外波段光谱反射比比较平坦,但是聚四氟乙烯漫反射板的反射率更接近于1,达到99%以上,因此最终选择了聚四氟乙烯材料^[3-7]。同时聚四氟乙烯漫反射板现已经被广泛的用于国外星上定标装置,如MODIS、VIIRS、MERIS。中科院安徽光学精密机械研究所多年聚焦于对漫反射板材料的研制,其研制的聚四氟乙烯(PTFE)漫反射板能够很好地满足作为星上定标漫反射板的应用需求,并经过环境模拟实验测试。结果表明,聚四氟乙烯漫反射板的光学特性受紫外辐照的衰变较小,在原子氧剥蚀、质子轰击环境下并没有发现明显的光学性能的衰变,符合国外对类似材料的研究结果,满足航天模拟环境下的稳定性和适应性^[8]。

采用“太阳+漫反射板”定标,并通过稳定性监视比辐射计对漫反射板稳定性进行监视的定标装置,在国外MODIS和VIIRS星上得到应用,根据相关资料显示,该定标方式能够得到较高的星上定标精度,并且对于漫反射板材料的衰变得到有效的监视。

采用了标准传递和转化的方法对研制漫反射板的方向半球反射比(DHR)、双向反射分布函数(BRDF)等光学特性进行了测量和标定,采用逐点测量的方法对研制漫反射板面均匀性进行了测试,并模拟卫星在发射和在太空运行过程中的振动状态对其进行了力学振动实验。根据实验结果,对研制漫反射板的光学特性及其在卫星振动条件下结构稳定性和适应性进行了分析。

2 星上定标及其设计原理

2.1 星上定标原理

选择太阳作为理想的定标光源,因其辐亮度是一个相对恒定的值(太阳常数),因此太阳可视为一个均匀且稳定的朗伯光源。“太阳+漫反射板”的定标原理如图1所示,通过漫反射板将太阳辐射引入星载传感器并将太阳辐射调节到星载传感器测量的动态范围内,对星载传感器进行绝对定标,可对星载传感器性能变化进行检测和校正。

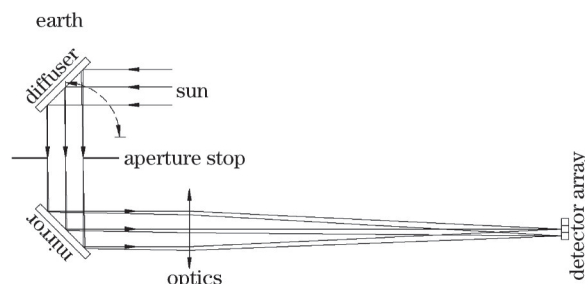


图1 “太阳+漫反射板”星上定标原理示意图

Fig.1 Diagram of “sun + diffuser panel” on-board calibration

其基本物理模型为:

定标以大气外太阳为参考光源,以漫反射板替代地球,产生已知辐射输入,传感器观测输出计数值与太阳-漫反射板反射辐亮度输入关系

$$\frac{E_{\text{sun}} F_{\text{BRDF}}[\theta_{\text{SD}}(t), \varphi_{\text{SD}}(t); \Omega_{\text{ref}}] \cos \theta_{\text{SD}}}{R^2 \pi} = F_{\text{sensor}}(t) [c_0 + c_1 I_{\text{DN}}(t) + c_2 I_{\text{DN}}^2(t)], \quad (1)$$

式中 E_{sun} 为大气外太阳常数, $F_{\text{BRDF}}[\theta_{\text{SD}}(t), \varphi_{\text{SD}}(t); \Omega_{\text{ref}}]$ 为传感器观测时刻的漫反射板双向反射分布函数, $I_{\text{DN}}(t)$ 为扣除暗电流后的传感器对漫反射板观测计数值, R 为日地距离, c_0, c_1, c_2 为传感器发射前定标系数。

根据(1)式,若漫反射板的BRDF已知,则可以对载荷定标确定其时间变化因子

$$F(t) = \frac{E_{\text{sun}} F_{\text{BRDF}}[\theta_{\text{SD}}(t), \varphi_{\text{SD}}(t); \Omega_{\text{ref}}] \cos \theta_{\text{SD}}}{R^2 \pi [c_0 + c_1 I_{\text{DN}}(t) + c_2 I_{\text{DN}}^2(t)]}, \quad (2)$$

即为太阳-漫反射板定标公式。

受到空间环境等因素的影响,星上漫反射板BRDF值随时间有一定的衰变,但BRDF分布不变,基本物理模型为

$$F_{\text{BRDF}}[\theta(t), \varphi(t)] = H(t) F_{\text{BRDF}}[\theta(t_0), \varphi(t_0)], \quad (3)$$

式中 $F_{\text{BRDF}}[\theta(t), \varphi(t)]$ 为发射后 t 时刻的漫反射板双向反射分布函数; $F_{\text{BRDF}}[\theta(t_0), \varphi(t_0)]$ 为发射时的漫反射板双向反射分布函数; $H(t)$ 为漫反射板衰变因子。

因此,需要采用稳定性监测比辐射计监测漫反射板的衰变因子。根据国外相关资料,MODIS使用的聚四氟乙烯漫反射板,其中 Aqua MODIS SD 衰减从 940 nm 处 0.6% 到 410 nm 处 19%^[9-10]。

2.2 漫反射板组件结构设计

漫反射板组件主要由漫反射板(solar diffuser)、基板(fundus)以及压块(block)组成,结构如图 2 所示。

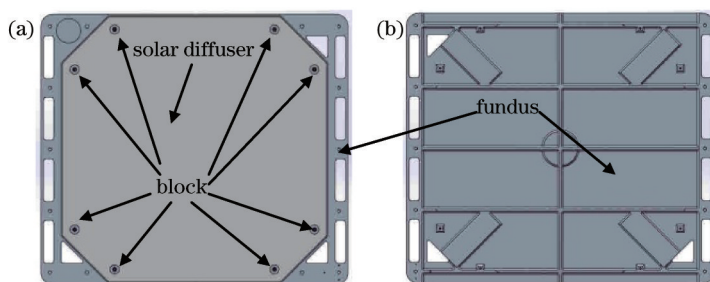


图 2 漫反射板组件效果图

Fig.2 Diagram of diffuser panel

漫反射板是该组件的关键部件,选用的材料是由中科院安徽光学精密机械研究所研制的聚四氟乙烯材料。研制的聚四氟乙烯漫反射板具有高反射率、近似朗伯体和光谱平坦等光学特性,而且在太空环境下受到真空紫外辐照,原子氧剥蚀、质子轰击等影响,聚四氟乙烯漫反射板的反射率累积年变化率低。但是,因为聚四氟乙烯本身属于塑性材料,其材料刚性低,抗振能力弱,因此需要刚性高的衬底—基板,用于加强其结构刚性。

基板和压块的材料选用铝合金 2A12-T4。该铝合金材料作为航天部件设计的常用选材,具有密度相对较小,结构刚性高,加工工艺成熟,且不易被高能粒子穿透等优点。同时,为了有效减少各器件对定标机构产生杂散光影响,需要对加工成型的铝件进行表面黑色阳极化处理。

作为上天器件,轻量化始终作为航天器件机械设计的核心关键。既要保证机构的稳定性,又要尽可能的减轻结构的重量。漫反射板的尺寸为 430 mm×430 mm,其尺寸较大,而且整个结构对重量要求很苛刻,因此在设计过程中,考虑在满足光路有效使用面积,将多余的地方切除。其设计效果如图 2(a)所示,其中八角状板为漫反射板,因光路中光斑为圆形,其四边拐角不被利用,因此可切除。而基板作为漫反射板载体,在满足对漫反射板安装固定和保护,尽可能将基板厚度减薄,从而减轻整个组件重量。为了提高其结构强度,增加加强筋,其结构如图 2(b)所示。

3 测量方法与原理

3.1 方向半球反射比

漫反射板的方向半球反射比(DHR)测量是通过分光光度计测量,测量时通过标准参照板的方向半球反射比传递来获取的。其原理是采用双光路积分球测量:在同一入射条件下对漫反射板小样(sample)与标准参照板(standard)进行比对测量,来实现方向-半球反射率的标准传递。双光路积分球系统如图 3 所示。

标准参照板和样品分别放置在积分球侧面的开口位置,反射镜 1(mirror 1)水平放置时,光路按实线所示垂直照射待测样品;反射镜 1(mirror 1)切换至 45°位置时,光路按虚线所示垂直照射标准参照板;探测器(detector)从积分球(integration sphere)顶部观测待测样品和标准参照板反射在半球空间内的均布亮度 V_{sample} 和 V_{standard} ;则目标方向半球反射比为

$$\rho_{\text{sample}}(0/d) = \rho_{\text{standard}}(0/d) \times \frac{V_{\text{sample}}}{V_{\text{standard}}}, \quad (4)$$

式中 $\rho_{\text{standard}}(0/d)$ 为标准参照板的方向半球反射比,其值溯源于国家计量科学研究院; $\rho_{\text{sample}}(0/d)$ 为待测样品方向半球反射比。

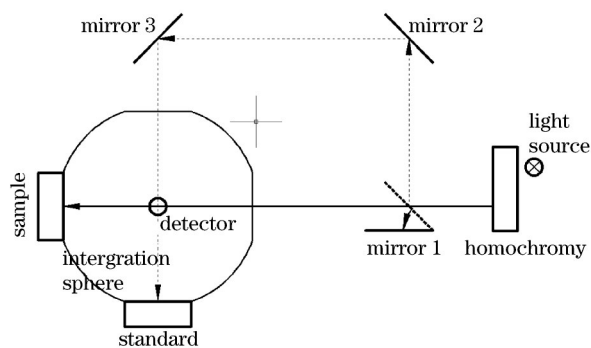


图 3 分光光度计测量 DHR 系统

Fig.3 DHR measurement of spectrophotometer

3.2 双向反射分布函数(BRDF)

双向反射分布函数(BRDF)^[11-12]的测量是通过中科院安徽光学精密机械研究所研制了高精度 BRDF 绝对测量系统来测量的,该测量系统是我国首台 BRDF 绝对测量装置。其照明光源是积分球辐射源,该积分球辐射源拥有高亮度、高稳定性、高均匀性的特点,装置通过串联式六轴机器人和中空分度盘为 BRDF 测量提供精准的测量位置姿态,通过几何、电子等相关物理量的高精度溯源及标校,实现了星上定标漫反射板 BRDF 小于 1% 的不确定度测量。BRDF 绝对测量系统如图 4 所示。

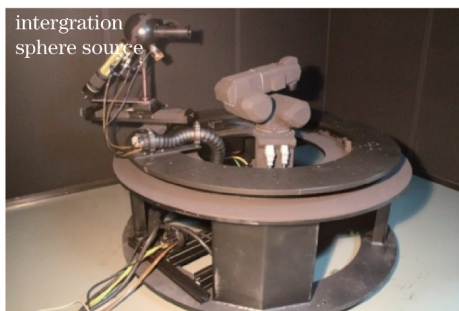


图 4 BRDF 绝对测量系统

Fig.4 BRDF absolute measurement system

BRDF 测试工作原理如图 5 所示。

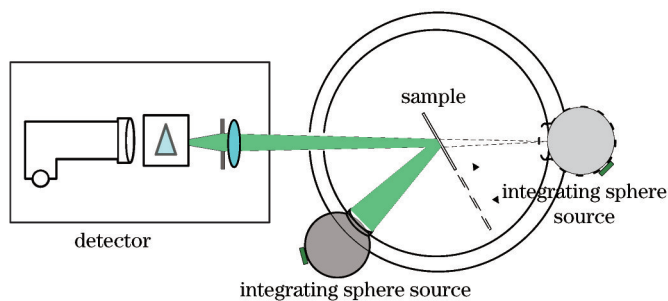


图 5 BRDF 绝对测量原理示意图

Fig.5 Principle diagram of absolute BRDF measurement

BRDF 的定义

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda) = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda)}{dE_i(\theta_i, \phi_i; \lambda)}, \quad (5)$$

对(5)式两边同时积分,可得

$$\int f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda) dE_i(\theta_i, \phi_i; \lambda) = \int dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda), \quad (6)$$

当且仅当照明光源光束面均匀性和角度均匀性足够好,以及照明和探测立体角足够小时, $f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda)$ 可近似看作常量,因此有

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda) = \frac{\int dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda)}{\int dE_i(\theta_i, \phi_i; \lambda)} = \frac{L_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda)}{E_i(\theta_i, \phi_i; \lambda)}, \quad (7)$$

根据 BRDF 测量几何关系, 可得

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda) = \frac{L_r}{\Omega_i \cdot L_i} = \frac{R^2}{A \cdot \cos \theta_i} \cdot \frac{I_{DN_r}(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda)}{I_{DN_i}(\theta_i, \phi_i; \lambda)}, \quad (8)$$

式中 Ω_i 为入射光束照明立体角, R 为光源-样品距离, A 为光源出光口面积, I_{DN_i} 表示探测器对入射光束响应电压的 DN 值(像素值)、 I_{DN_r} 表示反射光束响应电压的 DN 值。

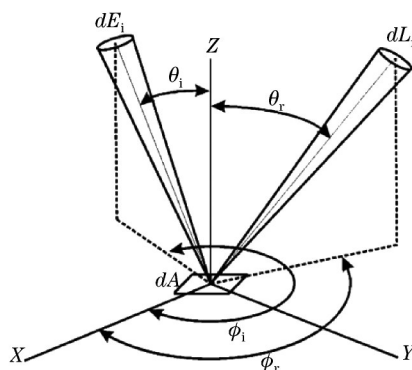


图 6 BRDF 测量几何关系

Fig.6 Geometry of BRDF measurement

实验可以测得的数据有:光源辐亮度、待测样品反射辐亮度、积分球出光口的面积和待测样品到积分球出光口的距离。通过几何因子转化的方法,将光源辐亮度和待测样品反射的辐亮度转化为样品上的辐照度和样品反射辐亮度,从而避免了对辐照度和辐亮度的绝对测量。同时,通过对两次测量信号的比值,从而消除了探测器响应的影响,减少了标准的溯源,实现高精度的测量。

3.3 面均匀性测试

面均匀性测试是指通过均匀面光源相对于漫反射板天顶 45° 角位置入射,漫反射板安装于高精度二维电动平移台上,沿着垂直于陷阱探测器光轴方向进行等间距移动,实现漫反射板表面不同位置相同照明和探测条件下的网格化扫描监测,计算相对标准偏差来评判漫反射板工作面的非均匀性。

面非均匀性计算公式为

$$u = \frac{V_{Std}}{\bar{V}} \times 100\%, \quad (9)$$

式中 u 为面非均匀性; V_{Std} 为各有效点测量电压值的标准偏差; \bar{V} 为各有效点测量电压值的均值。

3.4 力学振动实验

漫反射板组件作为航天器件,力学振动实验是漫反射板组件研发设计过程中的重要环节,对于验证漫反射板组件在振动环境中的可靠性有着至关重要的作用。

按照航天环境条件要求,对研制的星上漫反射板进行了力学振动冲击实验,振动实验条件如表 1 所示。

表 1 随机振动实验参数

Table 1 Random vibration test parameter

Parameter	Value		
Frequency /Hz	20~80	80~350	350~2000
Power spectral density	+3 dB/oct	0.04 g ² /Hz	-3 dB /oct
Root mean squared velocity	6 g		
Direction	X、Y、Z		
Time	4 min		

*Note: 1 g=9.80665 m/s²

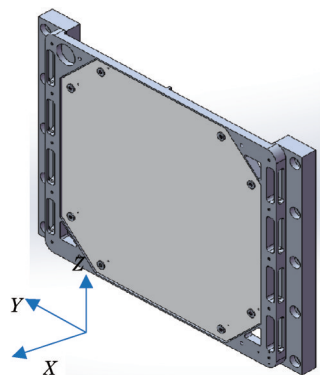


图7 振动方向

Fig.7 Direction of vibration

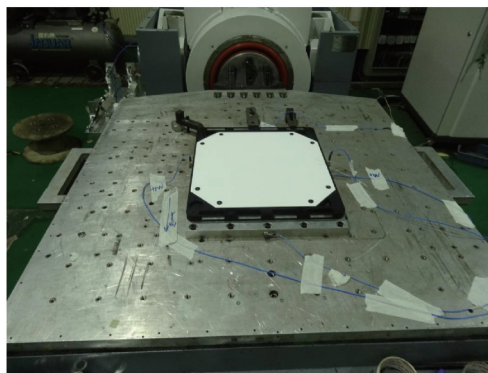


图8 振动实验沿 X轴方向振动

Fig.8 Vibration in X-direction

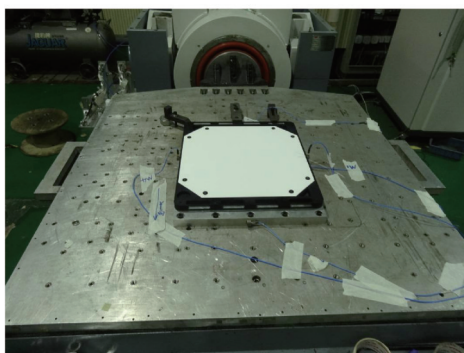


图9 振动实验沿 Y轴方向振动

Fig.9 Vibration in Y-direction

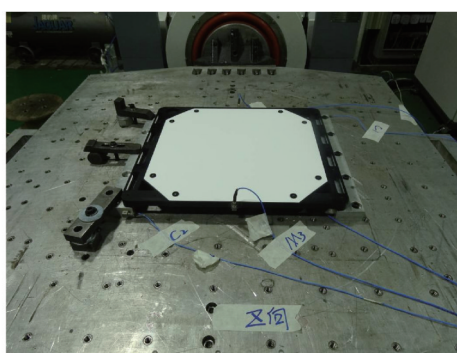


图10 振动实验沿 Z轴方向振动

Fig.10 Vibration in Z-direction

振动方向如图7所示。振动实物图如图8-10所示。其中振动实验时,夹具在振动过程中可能产生一定的放大影响,因此需要对其设置测点,进行监控。

4 结果分析与讨论

4.1 双向半球反射比(DHR)

DHR测量结果如下图所示。

如图11所示,在整个太阳反射波段(400~2400 nm),漫反射板的方向半球反射比都在0.95以上,尤其在可见-近红外波段,其方向半球反射比大于0.99,说明聚四氟乙烯漫反射板具有高反射率的特性,满足作为星上定标漫反射板材料的高反射率特性。

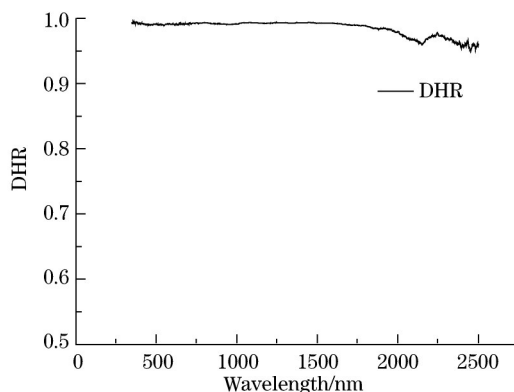


图11 方向半球反射比

Fig.11 DHR

4.2 双向反射比分布函数(BRDF)

漫反射板在天顶角(zenith angle) $10^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 、方位角(azimuth angle) $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 照明以及垂直观测条件下,在波长 900 nm 处测量所得 BRDF 值如表 2 所示。

表 2 900 nm 处双向反射分布函数(BRDF)
Table 2 Data of BRDF at 900 nm

Zenith angle /($^{\circ}$)	Azimuth angle /($^{\circ}$)					
	60	120	180	240	300	360
10	0.341	0.340	0.341	0.341	0.341	0.341
15	0.338	0.338	0.339	0.339	0.339	0.339
20	0.336	0.336	0.336	0.337	0.337	0.337
25	0.334	0.334	0.335	0.335	0.335	0.335
30	0.331	0.331	0.333	0.333	0.333	0.332
35	0.329	0.329	0.330	0.331	0.330	0.329
40	0.325	0.326	0.327	0.328	0.328	0.326
45	0.322	0.323	0.324	0.325	0.325	0.323
50	0.318	0.319	0.320	0.321	0.321	0.319
55	0.313	0.314	0.316	0.317	0.316	0.314
60	0.308	0.309	0.312	0.313	0.312	0.309
65	0.301	0.303	0.305	0.307	0.306	0.303
70	0.294	0.295	0.299	0.301	0.298	0.295
75	0.282	0.285	0.290	0.292	0.289	0.285

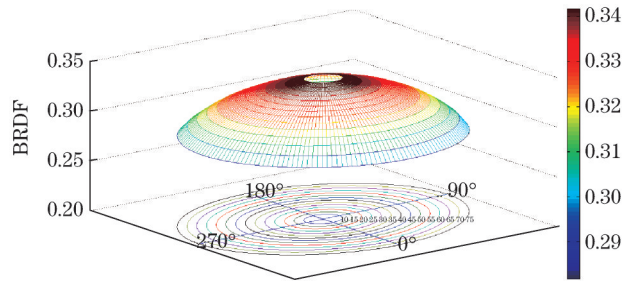


图 12 900 nm 处测量得到的双向反射分布函数

Fig.12 BRDF at 900 nm

从 BRDF 测量结果可以看出,漫反射板整体上呈现比较均匀的漫反射效果, BRDF 变化小于 0.06。考虑到在测试过程中实验室环境的杂散光影响因素、观测与照明角度的精度和积分球辐射源的稳定性等因素对漫反射板角度均匀性的影响,实际的 BRDF 变化可能更小。因此,聚四氟乙烯材料满足作为星上定标漫反射板材料的近似朗伯体的要求。

4.3 面均匀性

面均匀性检测结果如图 13 所示。

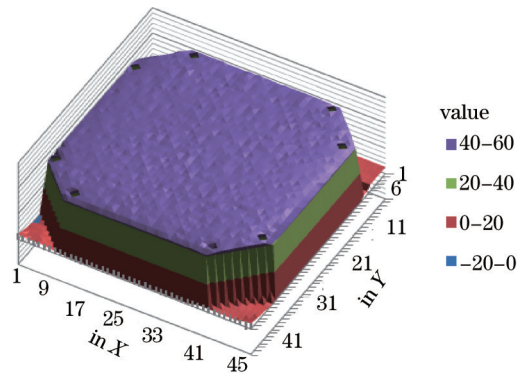


图 13 面均匀性测量结果

Fig.13 Surface uniformity test result

经测量计算得漫反射板面非均匀性为0.899%,聚四氟乙烯漫反射板具有较高的面均匀性,满足作为星上定标漫反射板材料的均匀光谱反射比的要求。

4.4 振动检测

X、Y、Z方向满振检测结果如图14所示。

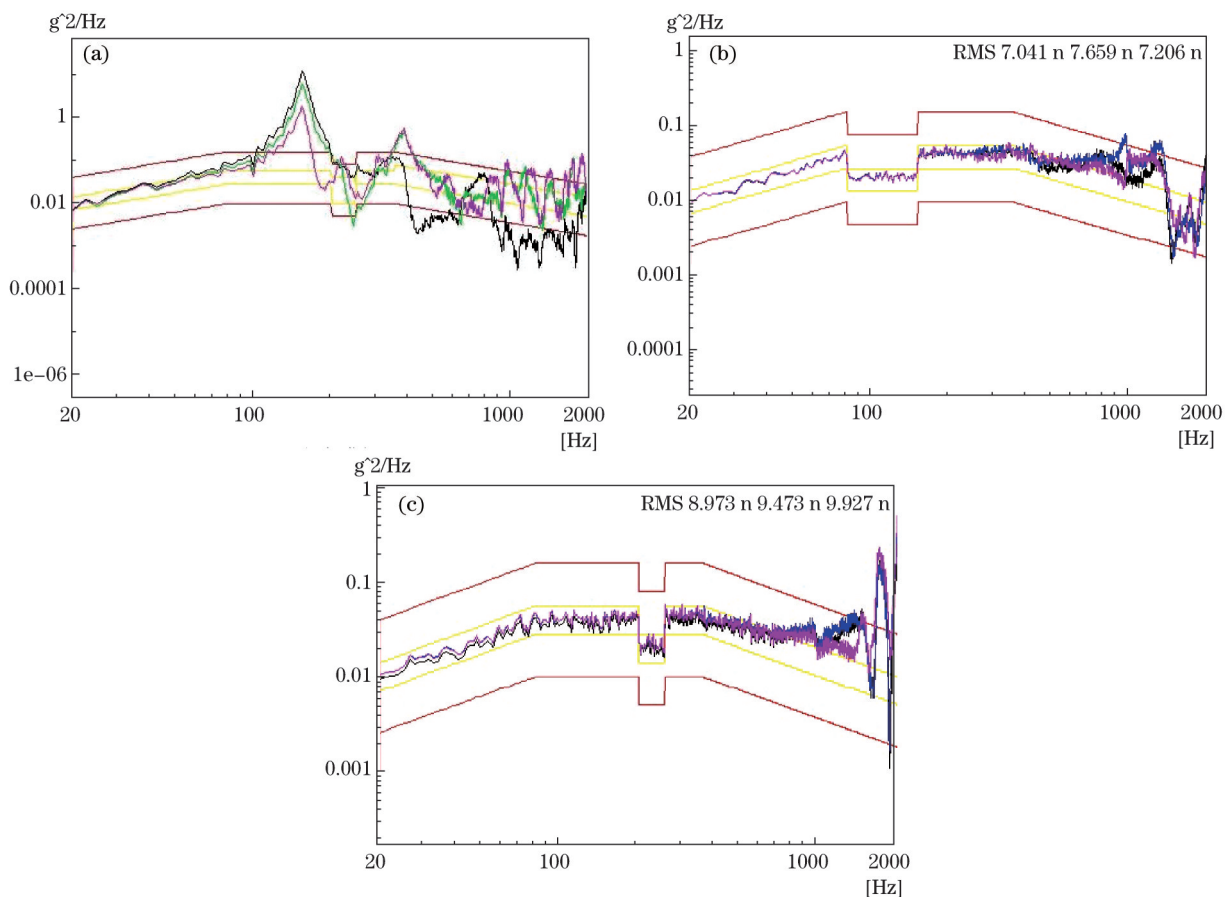


图14 满振检测结果。(a) X方向;(b) Y方向;(c) Z方向

Fig.14 Results of vibration test. (a) X direction; (b) Y direction; (c) Z direction

从试验结果可以看出,漫反射板组件在沿X向振动,其结构基频较小,但其第一基频值仍大于120 Hz,满足航天要求,能够在卫星发射以及飞行过程中满足结构稳定性和适应性的要求。

为了检查振动对聚四氟乙烯材料的光学特性的影响,对漫反射板在振动实验前后的BRDF均进行了测量,测量结果表明,排除测量设备的不确定度,振动实验前后的BRDF测量基本保持一致。因此,聚四氟乙烯漫反射板不仅能够经受航天发射以及在轨飞行的振动冲击,同时能够保证良好的光学特性,不受振动影响。

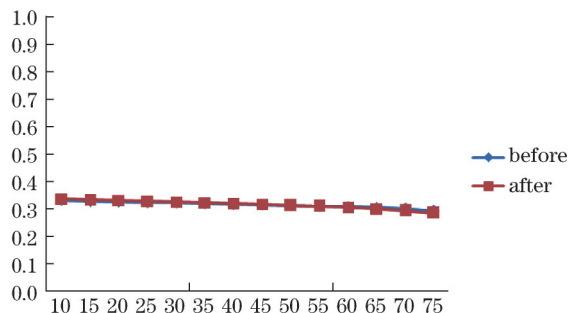


图15 振动实验前后900 nm处BRDF比较

Fig.15 BRDF at 900 nm before and after vibration test

5 结 论

聚四氟乙烯漫反射板具备作为星上定标漫反射板的光学特性要求:高反射率、均匀光谱反射比和近似朗伯体。研制的聚四氟乙烯漫反射板较之国外类似的漫反射板,其工作面积更大,但仍能保持良好的光学特性以及很高的面均匀性(面非均匀性为0.899%)。加工完成后的聚四氟乙烯漫反射板,其方向半球反射比在太阳反射波段大于0.95,尤其在可见近红外波段大于0.99;漫反射板在天顶角 $10^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 、方位角 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 入射照明、垂直观测条件下,其BRDF变化小于0.05;漫反射板经过航天振动冲击实验后,漫反射板结构保持完好,未出现任何裂纹,同时在振动实验前后其光学特性基本上保持一致,故其结构具有良好的结构稳定性和适应性。因此,研制的航天级漫反射板具备优良的光学特性,满足航天应用要求,以及在卫星遥感器上的星上定标应用要求。

参 考 文 献

- 1 Gu Xingfa, Tian Guoliang, Yu Tao, *et al.*. The Theory and Method of Radiometric Calibration of Space Optical Sensors[M]. Beijing: Science Press, 2013.
顾行发, 田国良, 于 涛, 等. 航天光学遥感器辐射定标原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- 2 Qiao Yanli, Zheng Xiaobing, Wang Xianhua, *et al.*. Whole-process radiometric calibration of optical remote sensors[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(5): 616-623.
乔延利, 郑小兵, 王先华, 等. 卫星光学传感器全过程辐射定标[J]. 遥感学报, 2006, 10(5): 616-623.
- 3 Liu Ying, Li Futian. Characteristics of various diffuser materials at UV-VUV spectral range[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(3): 371-375.
刘 颖, 李福田. 若干材料紫外-真空紫外漫反射特性的研究[J]. 光学学报, 2001, 21(3): 371-375.
- 4 Li Bo. Vacuum ultraviolet radiation characteristics of diffuser in spaceborne remote sensing instruments[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0912002.
李 博. 星载遥感仪器太阳漫透射板紫外辐照特性[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0912002.
- 5 National Aeronautics and Space Administration. Mitigating In-space Charging Effects[M]. Washington: NASA Technical Handbook, 2011.
- 6 D Heath, G Georgiev. A new approach for spectroradiometric calibration consistency on the ground and in space[J]. Earth Observing Missions and Sensors, 2012, 8528: 85280R.
- 7 W Flower, V Nelson. Performance of various diffuser materials in the absolute radiometric calibration of the SBUV/2[J]. Metrologia, 1993, 30(4): 255-257.
- 8 Yang Benyong, Zhang Liming, Sheng Zhiguo, *et al.*. Characteristic measurement of diffuser panel used for on-board calibration for satellite optical sensors[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(8): 1851-1858.
杨本永, 张黎明, 沈政国, 等. 光学传感器星上定标漫射板的特性测量[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1851-1858.
- 9 X Xiong, K Chang, J Esposito, *et al.*. MODIS on-orbit calibration an characterization[J]. Metrologia, 2003, 40: S89.
- 10 X Xiong, X Xie. Characterization of MODIS solar diffuser on-orbit degradation[J]. Earth Observing Systems, 2009, 7452: 74520Y.
- 11 Li Junlin, Zhang Liming, Chen Hongyao, *et al.*. Development of BRDF absolute measuring device[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0528002.
李俊麟, 张黎明, 陈洪耀, 等. 双向反射分布函数绝对测量装置研制[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0528002.
- 12 Chen Hongyao, Zhang Liming, Shi Jiading, *et al.*. High accuracy gonio reflectometer for solar diffuser spectral BRDF measurement[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2014, 1(9): 72-80.
陈洪耀, 张黎明, 施家定, 等. 高精度星上定标漫射板双向反射分布函数(BRDF)绝对测量系统研究[J]. 大气与环境光学学报, 2014, 1(9): 72-80.

栏目编辑: 刘丰瑞